

# High Resolution Subsurface Image Reconstruction using Near-Range Synthetic Aperture Radar

著者	Ahmed El Sayed Mohamed Hussein Gaber
号	10
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	学術(環)博第164号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/59012">http://hdl.handle.net/10097/59012</a>

氏 名	アハメド エイサイド モハメド ヒュッセン ガベル Ahmed El Sayed Mohamed Hussein Gaber
授 与 学 位	博士 (学術)
学 位 記 番 号	学術 (環) 博第 1 6 4 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 2 4 年 9 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 環境科学専攻
学 位 論 文 題 目	High Resolution Subsurface Image Reconstruction using Near-Range Synthetic Aperture Radar (近距離合成開口レーダによる高分解能地下イメージ再構成)
指 導 教 員	東北大学教授 佐藤 源之
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 佐藤 源之 東北大学教授 高橋 弘 東北大学准教授 陳 強 客員教授 Jung-Ho Kim (KIGAM)

## 論 文 内 容 要 旨

High resolution subsurface imaging reconstruction using a non-destructive probing technique has many important applications, for example in engineering, environmental sciences, geology, and archaeology, and is thus a fast growing field of science. Two different radar sensors, namely space-borne synthetic aperture radar (SAR) and ground penetrating radar (GPR), were used in this work to image the subsurface at different scales and platforms. The space-borne SAR is an effective method for exploring large-scale areas of difficult access (e.g. desert environments), while the GPR typically covers smaller areas and works at finer scales comparable to sub-pixel scale of space-borne SAR datasets. The GPR migration algorithm is mathematically very similar to the SAR processing of space-borne data, which is performed to focus the unprocessed dataset and increase the image resolution.

The 3D GPR reconstruction is useful to identify the depth, shape and size of subsurface targets from which the end-user can easily extract quantitative results. The main requirement that must be fulfilled to collect a GPR dataset that can be successfully transformed into a realistic 3D image is expressed by the Nyquist Theorem. The manual or conventional way of 3D GPR data acquisition is time-consuming, labor-intensive and most of all prone to positioning errors, which cause a severe degradation of the migration results and a decrease of resolution. Thus a new 3D GPR system

which consists of a combination between the Rotary Laser Positioning System (RLPS) with the commercial GPR system that was developed by the University of Miami has been introduced here in this work. Experiments were conducted to show that highly precise positioning information of the GPR antenna during measurement is crucial to reconstruct high resolution subsurface 3D image and saving survey time. Several field measurements and laboratory experiments were conducted using this system setup to test its effectiveness in showing high performance for detecting all targets especially the small ones with high resolution.

We performed 3D topographic migration of GPR data directly on irregular surfaces by recording the coordinates  $(x,y,z)$  of each GPR trace from the laser positioning system after improving the synchronization with the GPR system by developing a simple software (igps2gps). Since none of the current commercial software supports such sophisticated 3D topographic migration, we wrote our own processing and visualization software, which implements the diffraction summation migration algorithm. Two experiments were acquired in the sandpit of our GPR laboratory with almost the same configurations, except the ground surface topography was changed. Successful 3D topographic migration results were obtained, which validate our method and processing script.

The GPR antenna is more sensitive when crossing the linear target than moving parallel and over it. We proposed a new circular 3D GPR survey to image all the randomly distributed linear features at once and by doing so save survey time and guarantee that all linear targets are crossed and therefore detected. Several experiments were carried out to validate this proposed circular 3D GPR method and compare its result with the regular survey. None of the current commercial software support reading or processing these circular 3D GPR survey, thus we used our own processing script. The circular 3D GPR validation and comparison measurements show very good results to detect randomly distributed buried pipes, which mean this circular method can be effectively applied and used. On the other hand, by reducing the sampling density along the GPR survey direction, and comparing the corresponding image of each down-sampled datasets with the original data, we found that GPR data acquisition density along the survey line is still higher than required.

The ALOS/PALSAR L-band sensor was used to detect and delineate the subsurface structures along a selected site in the Western Desert of Egypt. The linear full polarimetric information (HH, HV, VH and VV) of ALOS/PALSAR scattering matrix was mathematically transformed into circular polarization basis. Linear, elliptical and circular polarization transformations were applied to the ALOS/PALSAR full polarimetric data by changing the orientation angle ( $\psi^\circ$ ) and elliptical angle ( $\chi^\circ$ ). The circular polarization ( $\psi = 0^\circ$  &  $\chi = 45^\circ$ ) proved to be the best transformation revealing many buried faults in various strike directions, which were not reported in the last version of the official geologic map. Such derived circular polarization images were further enhanced by applying the Optimal Polarization Contrast Enhancement (O.P.C.E) method. The effects of the measured moisture content ( $m_v$ ), relative dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) of the sand in the study area and average Root Mean Square Height ( $RMS_{height}$ ) of the surface roughness on the radar backscattered signals turned out to be very low providing, thus, good conditions for L-band to penetrate relatively deep. Moreover, 21 GPR profiles were acquired using 270 MHz shielded antenna to validate the radar remote sensing results, which reveal obvious offsets in the subsurface stratigraphy. Therefore, the average trend of the total power computed from GPR data can be compared to the total power scattering coefficient extracted from L band SAR images, opening the way to new interpretations of SAR images using GPR acquisitions.

# 論文審査結果の要旨

本研究はレーダ、特に地中レーダを用いた近距離のイメージング技術ならびに地中レーダと衛星マイクロ波リモートセンシングを併用して乾燥地域の環境を計測する技術に関するものである。合成開口レーダ信号処理による衛星マイクロ波リモートセンシングのイメージングは広く利用されているが、地中レーダの信号処理も基本的なアルゴリズムはこれと共通である。しかし2つの方法はセンサと対象物までの距離が大きく異なるため、特有の技術課題がある。本論文では、こうした問題を現状の技術と比較しながら論じている。

第1章では地中レーダと、それを利用する高精度な3次元イメージング手法の現状についてまとめている。

第2章では高精度な3次元イメージング手法(3DGPR)を詳しく説明したうえで、提出者が本手法を利用して計測・解析を行った埋設物検知、遺跡探査への応用例をまとめている。従来手法では実現できなかった高分解能により、飛躍的に実用性を高められる実例を示している。

第3章では、レーザ計測装置を利用して実現した高精度なアンテナ位置追跡システムを利用し、地中レーダを用いて、3次元の地下イメージングを行う3次元マイグレーションアルゴリズムを提案している。更に実験室レベルで起伏のある地表面下に埋設された物体を3次的に可視化できることを示した。

第4章では、実計測においてアンテナの偏波方向と、対象物の散乱特性が必ずしも最適な条件にないことを考慮に入れ、直線的な走査ではなく、周回走査を行うことで、問題が解決できることを提案した。本手法は樹根計測などへの応用が期待できる。一方、一連の計測において、データ取得間隔の最適化に関する理論的・実験的検討を行った。

第5章では地中レーダと、衛星に搭載されたマイクロ波合成開口レーダの統合的な利用に関してエジプトでの実データを利用して検討を行っている。論文提出者は、我が国の地球観測衛星ALOSに搭載された合成開口レーダPALSARで取得したエジプト南部、アスワン地域の砂漠地帯での偏波データを解析し、偏波状態の最適化により地質構造が可視化できることを示した。その上で、地中に構造が確認できた場所で地中レーダによるデータ取得を行った。地中レーダでは砂漠の砂の下部に明確な基盤が確認できたが、合成開口レーダの振幅を解析して、この構造との相関を見いだすことができた。つまり、衛星計測で、砂漠の地下構造が可視化できる可能を示すことができた。

第6章は結論である。

本論文は環境科学について2つの重要な知見を与えている。一つ目は地表面に起伏があっても広範囲を一度に計測できたり、古墳の頂上部など、従来地中レーダでは計測不能だった対象への適用も可能となる3次元的地中レーダ計測の手法を確立したことである。2つめは衛星レーダと地中レーダの併用による広域・精密計測の可能性を明示した点である。これらの手法は環境計測技術に大きな寄与をする知見である。

よって、本論文は博士( 学術 )の学位論文として合格と認める。